

高速回転軸シールの密封性能に関する研究

著者	井上 滉
号	1747
発行年	1996
URL	http://hdl.handle.net/10097/10554

氏 名	井 上 晃
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 9 年 3 月 14 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 4 4 年 3 月 京都工芸繊維大学大学院工芸学研究科生産機械工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	高速回転軸シールの密封性能に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 神山 新一 東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 加藤 康司

論 文 内 容 要 旨

原子力発電所用高温・高圧ポンプ，LNG 低温圧縮機，超電導発電機などの開発においては，従来の設計基準をはるかに越えた過酷な条件下でのシール装置の技術開発が緊急な課題として要請されるに至っている。これらの要請に応えるために，本研究では，高温・高圧・高速回転下で安定に作動する高性能シール装置の開発を目的として，メカニカル・シールおよび磁性流体シールを取り上げ，高温・高圧・高速回転下でそれぞれ生ずる諸問題の解決を図り，その性能改善策を提唱するものである。

第1章「序論」では，本研究の位置づけ，これまでの研究，研究の目的及び構成について述べた。

第2章「高温・高圧・高速用メカニカル・シールの基本特性改善に関する研究」では，メカニカル・シールの高温・高圧・高速下での使用時の基本特性を明らかにする。まず，メカニカル・シールは運転中圧力変動があると，漏れ量に不安定現象が現れる。この不安定現象は減圧時に発生する。原因は圧力にシールリングの変形量が圧力変動によって変化するために引き起こされるものであることを明らかにした。また，この不安定現象はカーボンリングに主原因があり，この現象を回避するためのシールリング断面零モーメント構造を提唱した。

次に，メカニカル・シールには漏れを最小にして，シール面の潤滑が維持できる潤滑限界があり，この限界値をシール特性数で表現することができる。さらに，高温高圧メカニカル・シールの摺動限界は摺動材の熱割れ（サーマルクラック）として現れ，限界はシール面の潤滑が不足するシール特性数の小さい場合と，シール面が負担する仕事量，すなわち， pV 値限界のあることを明らかにした。

第3章「メカニカル・シールの漏れ特性への流体慣性力の影響」では，メカニカル・シールの漏れ特性について，高速回転下で流体の慣性力が密封性能に及ぼす影響を無視できないことを非接触メカニカル・シールを用いて明らかにする。流体慣性力を考慮した理論漏れ量算出式を求め，とくに，圧力11.8MPa，回転数 10,000rpm までの高速高圧実験を行ない，流体慣性力の影響について実験値と比較検討した。流体慣性力の影響を考慮するパラメータとして慣性係数 S を定義し，ステップ形非接触メカニカル・シール特性の理論式を求めた。この結果，漏れ量算出にあたっては，本研究で定義した慣性係数 $S \geq 0.05$ の場合，流体慣性力の影響を考慮する必要があることを明らかにした。また，圧力損失係数 ζ を定義し，漏れの実験値を整理した結果は理論値とよく一致した。実験したレイノルズ数 $Re < 10^3$ の範囲では，

層流を仮定した式で漏れ量を計算することが出来る。さらに、シール面の流体剛性を検討し、漏れ変動や異常摺動を起こさない、安定したシール性能を得るための設計に必要な要素を、半径比 R_i 、 R_o およびステップ比 β に分け、性能のよいシールを得るには剛性 K_s の最大値を選ぶべきという、最適設計法を提唱した。

第4章「高温・高圧用メカニカル・シールの性能改善策に関する研究」では、以上の研究成果をもとに、初期漏れは限界バランス比に対するバランス比の割合で定義した安全率によって規制されるという初期漏れ回避設計法を示した。また、密封性能に悪影響するシール面の歪みについて製法、構造設計の面から解決法を明らかにした。さらに、原子力発電所用での高温・高圧・高速の過酷な条件下で使用されるメカニカル・シールの試作を行ない、シール面の発熱防止、摺動熱の迅速排除が最も重要な技術課題で、この問題解決のための放熱構造を提案した。

第5章「高速用メカニカル・シールの性能改善と機能付加」では、高速条件下で密封液が潤滑の場合、水に比べて摺動発熱が大きく、比熱が小さくて冷却効率が劣るのにもかかわらず、シール面の冷却構造の開発と、最適構造設計を行って、回転数15,000rpm、周速約90m/sという、今までにない高速用メカニカル・シールを開発した。さらに、高速運転される液化天然ガス圧縮機用メカニカル・シールの開発を行い、この圧縮機の特徴である機内圧がシール液圧より高くなるというシール面への密封圧力の逆圧作用でも、シール機能を満足させるシール装置の改善策を提案し、実験によりその効果を実証した。すなわち、メカニカル・シールのシール面の前後に印加される圧力の大小が交互に逆転しても、簡単な構造改良で、シール機能が喪失することのない通常のメカニカル・シールのように機能する、逆圧密封機能を備えたシール装置を開発した。これによって、LNG圧縮機や、同様のシール機能が要求されるLNG発電用タービンに適用可能になった。

第6章「高速磁性流体軸シールの基本特性に関する研究」では、磁性流体軸シールを高速回転軸シールに応用するために、高速回転下で流体中に生ずる遠心力を併用した遠心式磁性流体軸シールの採用を提案し、その基本特性を明らかにした。すなわち、遠心磁性流体シールの限界密封圧力は軸回転数60Hzまで、 5×10^4 Paであること、密封性能は軸回転振動が0.2mm以下では影響を受けないこと、軸方向すきま C が小さくなると、限界密封圧力は大きくなり、密封圧力は、すきま C に反比例することを明らかにした。さらに、軸の偏心量が大きくなると密封圧力は小さくなり、特に、軸回転数が40Hz以上では顕著であること、磁石の傾斜が大きくなると、密封圧力は減少し、この現象は低速回転域で顕著であること、磁束を集中させる突起のピッチが小さいほど、限界密封圧力は高くなり、この傾向は軸回転の低速領域ほど顕著である。また、実験した磁性流体の温度範囲では、温度はあまり密封性能に影響しない。磁気圧力は低速回転の時には重要である。回転数が大きくなると流体の遠心力効果が支配的となる、などを明らかにした。これによって、遠心磁性流体シールは軸振動の大きな回転機械には有効であることを明らかにした。

第7章「磁性流体軸シールの高速回転軸への適用」では、前章で提案した磁性流体軸シールを超電導発電機の軸シールとして利用するための試作と、その密封特性を明らかにした。すなわち、ヘリウム・トランスファー・カプリングを通して液体ヘリウムに伝わる熱量は、軸の回転数に関係なく一定である。侵入熱量はバヨネットパイプの挿入長さに反比例する。挿入長さが125mm、半径すきま0.5mmの場合、3watts以下である。また、遠心磁性流体シールの性能は軸回転数が0～60Hzで、 4.5×10^4 Pa以上のシール性能があり、ヘリウム・トランスファー・カプリングに要求される値の2倍である。侵入熱とシール性能が確保されたので、 1.39×10^{-5} m³/s (50 l/h)以上の液体ヘリウムを、ヘリウム・トランスファー・カプリングを用いた発電機ロータの中に供給することが出来る。この結果から、開発したヘリウム・トランスファー・カプリングは50MVA超電導発電機に有効に使えることが証明できた。

第8章「結論」では、本研究の主な成果を要約し、結論を述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

本論文は、原子炉用再循環ポンプの回転軸シールなど、従来の設計基準をはるかに越えた高温・高圧・高速回転下で作動するシール装置の開発を目的として、メカニカルシール及び磁性流体シールを取り上げ、過酷な運転条件下で発生する諸問題の解決を図り、その性能改善策について詳細な検討を行ったもので、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、高温・高圧・高速回転下でのメカニカルシールの基本特性について検討し、漏れ量を最小にするシール面の潤滑限界、シール面の摺動限界を明らかにし、また、密封圧力の変動によっても傾斜や変形を起こさないシールリングの開発を行っている。これは有用な成果である。

第3章では、ステップ型非接触式メカニカルシールの漏れ特性について考察し、高速回転下での慣性力が密封性能に及ぼす影響を無視できないこと、さらに、性能のよいシールを得るには剛性を最大にするステップ比を選ぶべきことを明らかにしている。これは工学上有用な知見である。

第4章では、以上の成果をもとに、高温・高圧・高速の過酷な条件下で使用される原子力発電用でのメカニカルシールの試作を行い、実験的検討により、安定に作動ししかも高性能を発揮するシールとしての必要条件として、放熱構造の改善およびバランス比、表面あらさ等の最適化設計法を提案している。これは工学上有用な示唆である。

第5章では、高速回転下で密封液が潤滑油の場合のシール面冷却性能の改善策について検討し、周速約90m/sという今までにない高速用メカニカルシールの開発に成功している。また、シールの左右に印加される圧力差が交互に逆転してもシール機能を喪失しない逆圧密封機能を備えたシール装置を開発している。これらは極めて有用な知見である。

第6章では、磁性流体シールを高速回転軸シールに応用するために、高速回転下で流体中に生ずる遠心力を利用した遠心式磁性流体軸シールの採用を提案し、その基本特性を明らかにするなど工学上有用な示唆を与えている。

第7章では、磁性流体軸シールを超電導発電機の軸シールとして利用するための試作を行い、その密封性能を明らかにし、実機への応用が可能であることを示している。これは工学上有用な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、高温・高圧・高速回転下で作動する軸シールの開発に関連して、メカニカルシール及び磁性流体シールの性能改善策に取り組み、新たな軸シールの設計基準を確立するとともに、過酷な運転条件下にある実機への応用に成功したものであり、機械工学、機械要素設計学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。